

Нейромережеве моделювання в задачі локалізації джерел землетрусів території України

О.О. Герасименко¹, А.О. Шумлянська¹, А.І. Надежка², О.З. Ганієв¹, С.П. Пивоваров², Н.М. Остапчук¹, Н.Л. Шипко¹, 2020

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

²Федеральний дослідницький центр Єдиної геофізичної служби Російської академії наук, Обнінськ, Росія

Надійшла 20 січня 2019 р.

Приведен пример использования нейросетевого моделирования в задаче локализации очагов землетрясений территории Украины, зарегистрированных сетью сейсмических станций ИГФ НАН Украины «Одесса», «Сквира», «Полтава», «Николаев». По данным мониторинга 2007—2019 гг. авторами сформированы базы сейсмологической информации локальных и региональных событий, зарегистрированных на станциях сети наблюдений. При использовании возможностей мощного инструмента статистического анализа — нейронных сетей, построены локальные годографы P -, S -волн территории Украины, а именно землетрясений Украинского щита, Днепроовско-Донецкой впадины и акватории Азовского моря в диапазоне магнитуд 2,7—4,8 по записям четырех сейсмических станций ИГФ в форме, позволяющей интегрирование их в современные средства цифровой обработки. Для уточнения времен прихода фаз сейсмических волн в пределах исследуемого региона, плохо поддающихся визуальным оценкам, при обработке сигналов использованы программируемые приложения высокого уровня на моделируемых азимутах. Приведены образцы работы сети в операционном режиме. Моделирование задачи локализации позволяет с достаточной точностью конструировать очаги сейсмических событий в промышленных регионах Украины, что подтверждает экзамен полученных результатов глобальными годографами Джеффриса—Буллена. Примеры локализации землетрясений 2011, 2013 гг. с магнитудой 3,9 и 4,6 в районе Криворожского бассейна дают дополнительные возможности для анализа особенностей строения литосферы, а в перспективе — оценки в условиях реального времени характеристик сейсмического процесса в задаче его предупреждения.

Ключевые слова: очаг, землетрясение, локализация, нейронные сети, моделирование, годограф, сейсмические станции, территория, Украина, волны, оценка, реальное время, процесс, предупреждение.

Локалізація джерела зареєстрованого землетрусу є основним завданням сейсмологічної служби. Єдиною реальною величиною, що вимірюється за записами землетрусів, є час вступу фаз різного типу хвиль. Основним компонентом процедури визначення просторових координат джерела є годограф. Для телесеісмічних подій розв'язання цієї задачі забезпечується глобальними годографами, тоді як для місцевих подій застосування глобальних годографів призводить до великих похибок у

визначенні часу надходження окремих фаз сейсмічних хвиль, що впливає на точність визначення координат джерела локальної сейсмічної події. І хоча реальною загрозою є джерело небезпеки у зоні Вранча, важливою проблемою сейсмологічної служби України на межі двох тисячоліть стала побудова локальних гілок годографів у задачі локалізації землетрусів території України у зв'язку із збільшенням магнітуди місцевих землетрусів до рівня, що перевищує шумовий поріг. Втручання у будову літосфери,

що властиве промислово розвиненим територіям, призводить до порушення геодинамічної рівноваги шовних зон Українського щита (УЩ) і зміщення сейсмічних меж Дніпровсько-Донецького авлакогену.

Вперше проблема локалізації землетрусів слабкої сейсмічності УЩ стала актуальною в 1984 р. після побудови Новодністрівської ГЕС ($M = 3,1—3,6$) [Андрущенко, Кутас та ін., 2013]. З 1996 р. почалась реєстрація сейсмічними станціями України землетрусів: у районі Коростенського плутону 28 квітня з магнітудою 3,5 (повторення події 29 грудня 1997 р., $M = 3,3$) і в Криворізько-Кременчуцькій зоні розломів 4 травня з магнітудою $\sim 3,3$ (повторення 25.12.2007, $M = 3,7$; 14.01.2011, $M = 3,9$; 23.06.2013, $M = 4,6$). Активізацію локальних подій в діапазоні магнітуд 3,0—4,8 на території України простежували за даними реєстрації мережі станцій ІГФ, а також мереж Міжнародної системи моніторингу станцій Карпатської ОМСП, Кримської мережі, Головного центру спецконтроля ГЦСК НКА України. Для Східно-Європейської платформи (УЩ, ДДЗ) було проаналізовано природу походження сейсмічних сигналів та геолого-геофізичні дані регіонів збудження та розроблено критерії ідентифікації записів локальних землетрусів і промислових вибухів [Кутас, и др., 2007, 2009, 2010; Кендзера и др., 2008, 2012; Андрущенко и др., 2013; Пустовитенко и др., 2010, 2012; Габсатарова и др., 2013, 2016].

Для вирішення завдання локалізації джерел землетрусів і подальшого оцінювання сейсмічного ризику найнебезпечніших ділянок необхідне рівномірне покриття території України сучасними сейсмічними станціями з урахуванням яскраво вираженої латеральної анізотропії фізичних властивостей окремих досліджуваних ділянок континентальної літосфери. Аналіз координат Криворізького землетрусу 2007 р., отриманий за даними каталогів різних агенцій, свідчить про велику похибку визначення джерела землетрусу, особливо станціями реєстрації на великій епіцентральної відстані [Кутас и др., 2007].

Конфігурація розташування сейсмічних

станцій Інституту геофізики НАН України: «Сквира-МІ03», «Полтава-МІ02», «Одеса-МІ05», а також «Миколаїв-МІ07», «Дніпро-МІ04» (працюють з 2013 р.) розроблена з урахуванням необхідності вивчення, по-перше, закономірностей розподілу інтенсивності струсу від землетрусів Вранча, а по-друге, глибинної будови континентальної літосфери та особливостей між- і внутрішньоплитової сейсмічної активності тектонічних структур УЩ і ДДЗ у межах території України.

Під керівництвом наукового керівника к.г.н., с.н.с. М.А. Лазаренка за даними моніторингу 2001—2016 рр. було започатковано формування цифрової бази сейсмологічної інформації для побудови регіональних і локальних багатопараметричних годографів за даними реєстрації землетрусів на території України та за її межами. Для вирішення поставленого завдання була обрана багатопараметрична, повнозв'язана, прямопоточна, керована мережа штучних нейронів, навчання в якій здійснюється методом зворотної передачі помилки [Лазаренко, Герасименко, 2010; Лазаренко и др., 2011].

Функціонування нейронної мережі складається з наступних основних етапів: а) організація навчальної множини; б) власне навчання; в) операційний режим — екзамени мережі за допомогою навчальної вибірки, що не брала участі у навчанні. Зареєстрована на сейсмічній станції подія характеризується п'ятивимірним вектором параметрів з компонентами: глибина фокуса землетрусу, магнітуда, зворотний азимут, епіцентрально відстань, час пробігу поздовжніх і поперечних хвиль:

$$x_{n,i} = (x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,4}, t_n), \quad (1)$$

де $x_1 = h$ (глибина гіпоцентру), $x_2 = M$ (магнітуда), $x_3 = r$ (відстань), $x_4 = b - az$ (зворотний азимут), t_n — цільове значення, що дорівнює часу надходження до точки спостереження певної фази хвилі, збудженої n -м землетрусом.

Для формування навчальної множини в задачі побудови нейромережових моделей локальних годографів P - і S -хвиль було відібрано найбільш кондиційну сейсмологічну

інформацію на епіцентральных відстанях ≤ 10 , глибини ≤ 50 км, із 259 трикомпонентних записів землетрусів відповідно по станціях: «Сквира»-72, «Одеса»-123, «Полтава»-38, «Миколаїв»-26. Сейсмічними станціями ІГФ було зареєстровано 42 локальні сейсмічні, в тому числі події, небезпечні в межах промислових територій, події густонаселених районів з магнітудою в інтервалі 3,7—4,8, з них — 25.12.07, 11.01.14, 23.06.13 (Кривий Ріг, $mb = 3,7; 3,9; 4,6$), 03.02.15 (Сумы, $mb = 4,6$), 19.07.15 (Тячев, Закарпаття, $mb = 3,9$), 18.10.15 (Азовське море, $mb = 4,7$), 07.08.16 (Маріуполь, $mb = 4,8$), 30.05.19 (Миколаїв, $mb = 4,1$), а також 27 землетрусів з магнітудою $< 3,5$.

Для побудови навчальної вибірки нейромережових моделей годографів P - і S -хвиль координати, час і глибина землетрусів були відібрані за найбільш кондиційною сейсмологічною інформацією міжнародних центрів NEIC, EMSC, ГЦСК НКА України, станцій Карпатської і Кримської мереж, ГС РАН (OBN).

При інтерпретації сигналів низького енергетичного рівня великою перешкодою виокремленню вступу сейсмічних сигналів стає зашумленість трас, що призводить до додаткових помилок інтерпретації, а також поглинання шумом вступу фаз локальних землетрусів. Застосування багатопараметричних нейромережових моделей годографа дає змогу якнайліпше усереднювати зашумлені дані спостережень, що зв'язують дві величини: час пробігу хвилі й відстань. Важливе значення має поглиблений аналіз сейсмічних записів засобами пакетів програмованих прикладних програм MS-DOS PITSA (Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis) [Sherbaum, Johnson, 1994], що дає змогу якісно виокремити час вступу некондиційного матеріалу. Приклади інтерпретації Z -компоненти зареєстрованих P -, S -хвиль локальних сейсмічних подій з найчіткішими фазами вступу сейсмічних показано на рис. 1, 2, на рис. 3 — взірці типових реєстрацій. Параметри землетрусів наведено за даними Інтернет-служби EMSC.

Для всієї множини векторів за допо-

могою вибраної навчальної структури було сформовано матрицю кодів, яка має здатність узагальнити вихідну множину і таким чином спрогнозувати поведінку модельованої системи або її окремих елементів. Ітераційна процедура навчання проводилась з вчителем, на виході мережі задавалась цільова функція, відхилення від якої для кожного з векторів навчаючої множини окремої станції після завершення навчального процесу має бути мінімальним. У нашому прикладі таким цільовим значенням є час пробігу двох фаз — вступу хвиль P і S , зареєстрованих на станціях мережі спостережень.

Навчання мережі для кожного сигналу (вхідного вектора) відбувається в два етапи:

а) пряме поширення з вирахуванням середньоквадратичної похибки, яка визначає рівень навченості мережі:

$$E = 1/2 \sum_{j=1}^m (t_j - y_j)^2, \quad (2)$$

де для j -го вузла t_j — цільове значення; y_j — біжучий вихід;

б) зворотна передача похибки, яка мінімізує помилку мережі методом найшвидшого спуску, у такий спосіб пристосовуючи ваги нейронів:

$$w_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) - \mu \frac{dE}{d\omega_{ij}}, \quad (3)$$

де w_{ij} — вага зв'язку між i -м вузлом шару l та j -м вузлом шару $l-1$; t — номер ітерації; μ — коефіцієнт швидкості навчання. Процес навчання вважають таким, що збігся, якщо ціна похибки (1) досягає деякої заданої величини або не змінюється протягом достатньої кількості ітерацій.

Навчання мережі розпочинається градієнтним спуском з деякої точки поверхні функції похибок, яка визначається безліччю випадкових ініційованих (стартових) значень ваг, старанням досягти її глобального мінімуму, який і визначатиме кінець ітераційного процесу навчання. Таким

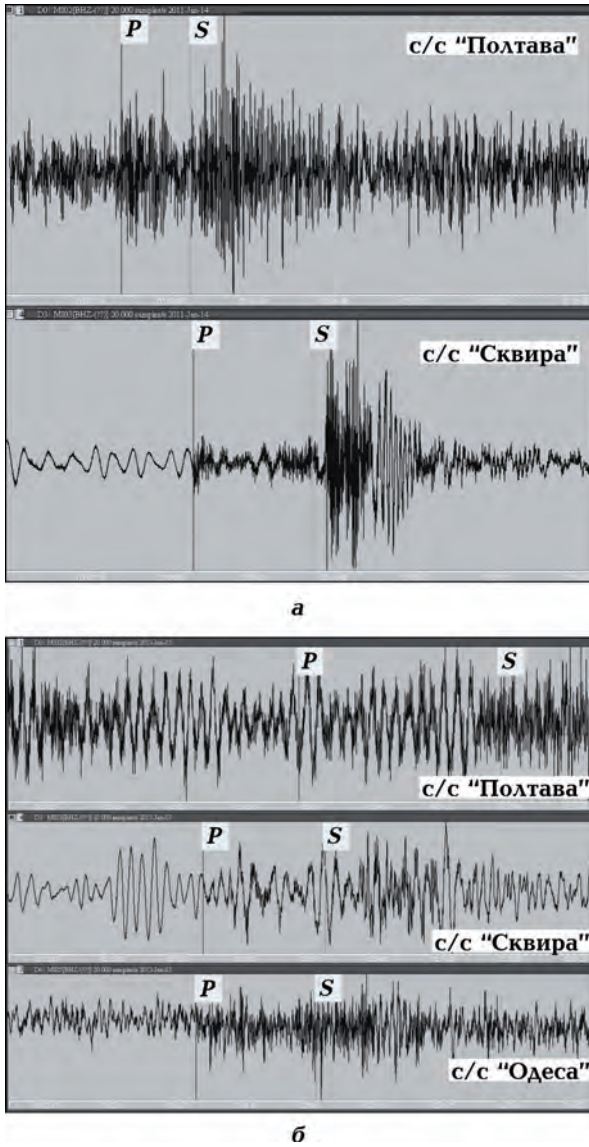


Рис. 1. Ділянки реєстрації Z-компонента запису локальних землетрусів: *a* — 14.01.2011 р., $\varphi = 48,14^\circ$, $\lambda = 33,29^\circ$, $M = 3,9$, $h = 30$ км, що зареєстровані сейсмостанціями «Полтава», $\Delta = 187$ км, «Сквира», $\Delta = 319$ км; *б* — 03.01.2013 р., $\varphi = 47,01^\circ$, $\lambda = 25,36^\circ$, $M = 3,4$, $h = 5$ км, сейсмостанціями «Полтава», $\Delta = 739$ км, «Одеса», $\Delta = 424$ км, «Сквира», $\Delta = 438$ км.

Fig. 1. Registration areas of the Z-component records of local earthquakes: *a* — 14.01.2011, $\varphi = 48,14^\circ$, $\lambda = 33,29^\circ$, $M = 3,9$, $h = 30$ km; seismic stations «Poltava», $\Delta = 187$ km, «Skvyra», $\Delta = 319$ km; *б* — 03.01.2013, $\varphi = 47,01^\circ$, $\lambda = 25,36^\circ$, $M = 3,4$, $h = 5$ km; seismic stations «Poltava», $\Delta = 739$ km, «Odessa», $\Delta = 424$ km, «Skvyra», $\Delta = 438$ km.

чином, формується множина для навчання мережі штучних нейронів, яка (після навчання) сформує модель часу реєстрації фаз сейсмічних хвиль індивідуальної сейсмічної станції.

Архітектуру мережі підбирали методом проб і помилок, найліпшими, з огляду на швидкість збіжності ітераційного процесу навчання і величину остаточної помилки, виявилися структури одношарової мережі з архітектурою НМ = 4:10:1 за записами с/с

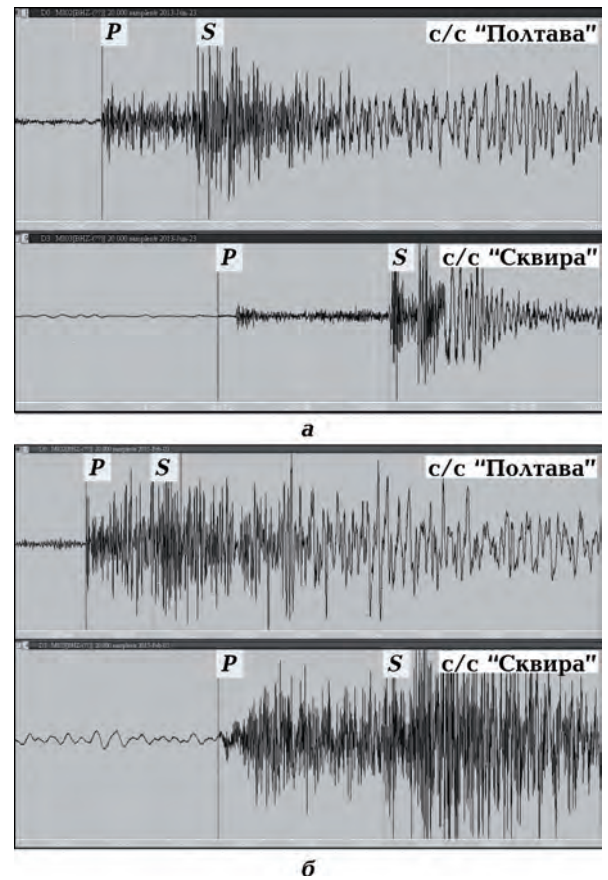


Рис. 2. Ділянки реєстрації Z-компонента запису локальних землетрусів: *a* — 23.06.2013 р., $\varphi = 48,12^\circ$, $\lambda = 33,45^\circ$, $M = 4,6$, $h = 2$ км, с/с «Полтава», $\Delta = 193$ км, «Сквира», $\Delta = 329$ км; *б* — 03.02.2015 р., $\varphi = 50,65^\circ$, $\lambda = 34,21^\circ$, $M = 4,6$, $h = 10$ км, сейсмостанціями «Полтава», $\Delta = 119$ км, «Сквира», $\Delta = 341$ км.

Fig. 2. Registration areas of the Z-component records of local earthquakes: *a* — 23.06.2013, $\varphi = 48,12^\circ$, $\lambda = 33,45^\circ$, $M = 4,6$, $h = 2$ km; seismic stations «Poltava», $\Delta = 193$ km, «Skvyra», $\Delta = 329$ km; *б* — 03.02.2015, $\varphi = 50,65^\circ$, $\lambda = 34,21^\circ$, $M = 4,6$, $h = 10$ km; seismic stations «Poltava», $\Delta = 119$ km, «Skvyra», $\Delta = 341$ km.

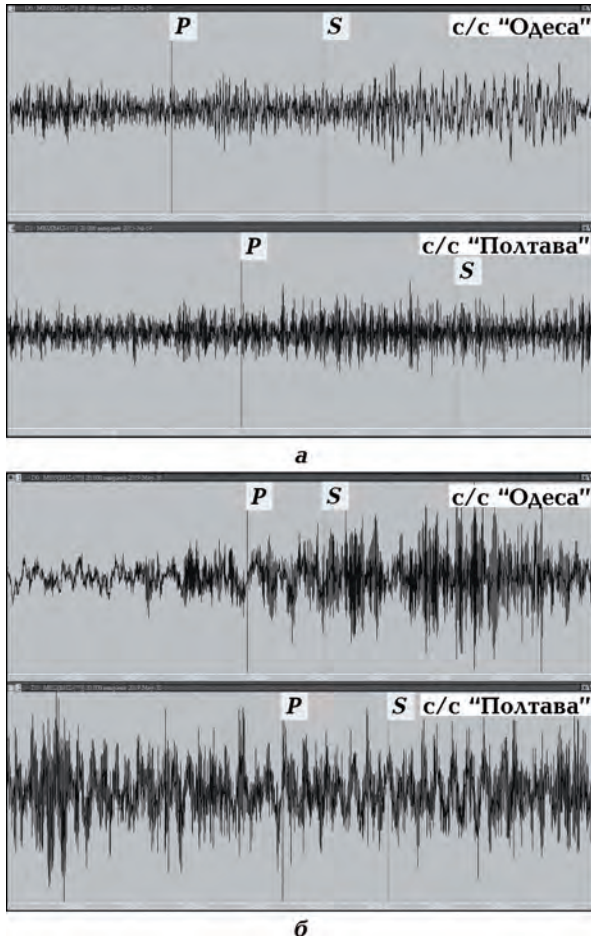


Рис. 3. Ділянки реєстрації Z-компонента запису локальних землетрусів: *a* — 19.07.2015 р., $\varphi = 48,12^\circ$, $\lambda = 23,64^\circ$, $M = 4,1$, $h = 10$ км, сейсмостанціями «Одеса», $\Delta = 289$ км, «Полтава», $\Delta = 262$ км; *б* — 30.05.2019 р., $\varphi = 46,81^\circ$, $\lambda = 33,87^\circ$, $M = 3,9$, $h = 2$ км, «Одеса», $\Delta = 227$ км, «Полтава» $\Delta = 168$ км.

Fig. 3. Registration areas of the Z-component records of local earthquakes: *a* — 07.19.2015, $\varphi = 48,12^\circ$, $\lambda = 23,64^\circ$, $M = 4,1$, $h = 10$ km; seismic stations «Odessa», $\Delta = 289$ km, «Poltava», $\Delta = 262$ km; *б* — 30.05.2019, $\varphi = 46,8^\circ$, $\lambda = 33,87^\circ$, $M = 3,9$, $h = 2$ km; seismic stations «Odessa», $\Delta = 227$ km, «Poltava», $\Delta = 168$ km.

«Сквира», «Одеса» та двошарових — с/с «Полтава» НМ = 4:4:5:1 і «Миколаїв» НМ = 4:10:5:1. Випробування різних комбінацій кількості вузлів і коефіцієнтів швидкості навчання показало, що оптимальний діапазон за швидкістю збіжності процесу навчання і гладкості функції помилок становить $2,0E - 2 \leq \mu \leq 1,0E - 1$ для одношарової і $1,0E - 2 \leq \mu \leq 5,0E - 1$ для двошарових моделей (рис. 4).

Отримана в оперативному режимі модель спроможна формувати нелінійні моделі поля часу поширення фаз сейсмічних хвиль досліджуваного регіону як функції декількох аргументів, в нашому випадку: глибини джерела, магнітуди, азимуту приходу хвилі та епіцентральної відстані, включно й час реєстрації сейсмічної хвилі на станції реєстрації, збудженої в довільній точці регіону дослідження, з параметрами джерела, які лежать у межах інтервалів існування складових векторів навчальної вибірки.

Матриця кодів, отримана в результаті роботи мережі в режимі навчання, використовувалась в операційному режимі — нейронній мережі пропонувалось визначити час пробігу фази хвилі, згенерованої вектором \tilde{x}_i , $i = 1, \dots, 4$, з координатами:

$$\tilde{x}_1 = \left(\sum_n h \right) / n, \quad \tilde{x}_2 = \left(\sum_n M \right) / n, \\ \tilde{x}_3 = \left(\sum b - az \right) / n, \quad \tilde{x}_4 = \Delta_k, \\ k = 1, \dots, 1000, \quad (4)$$

де n — кількість членів множини навчальної вибірки.

З бази даних, зареєстрованих сейсмічними станціями, було вибрано вісім подій, які не брали участі у навчанні, а зберігались для іспиту. Навчену нейронну мережу збуджували сигналом (вектором параметрів), сформованим з екзаменаційної вибірки, а вихід мережі порівнювали з бажаними значеннями, у нашому випадку t_p , t_s — цільовими значеннями, що дорівнювали часу надходження до станції спостереження фази хвилі, збудженої n -м землетрусом (табл. 1).

Рис. 5 ілюструє графіки сформованих нейромережових годографів P - та S -хвиль станцій реєстрацій (графіки 1, 2). На графіку 5 $t_s - t_p$ точками позначені значення t_s землетрусів екзаменаційної вибірки, отриманих після роботи мережі в оперативному режимі. Досить точні приклади моделювання демонструють спроможність

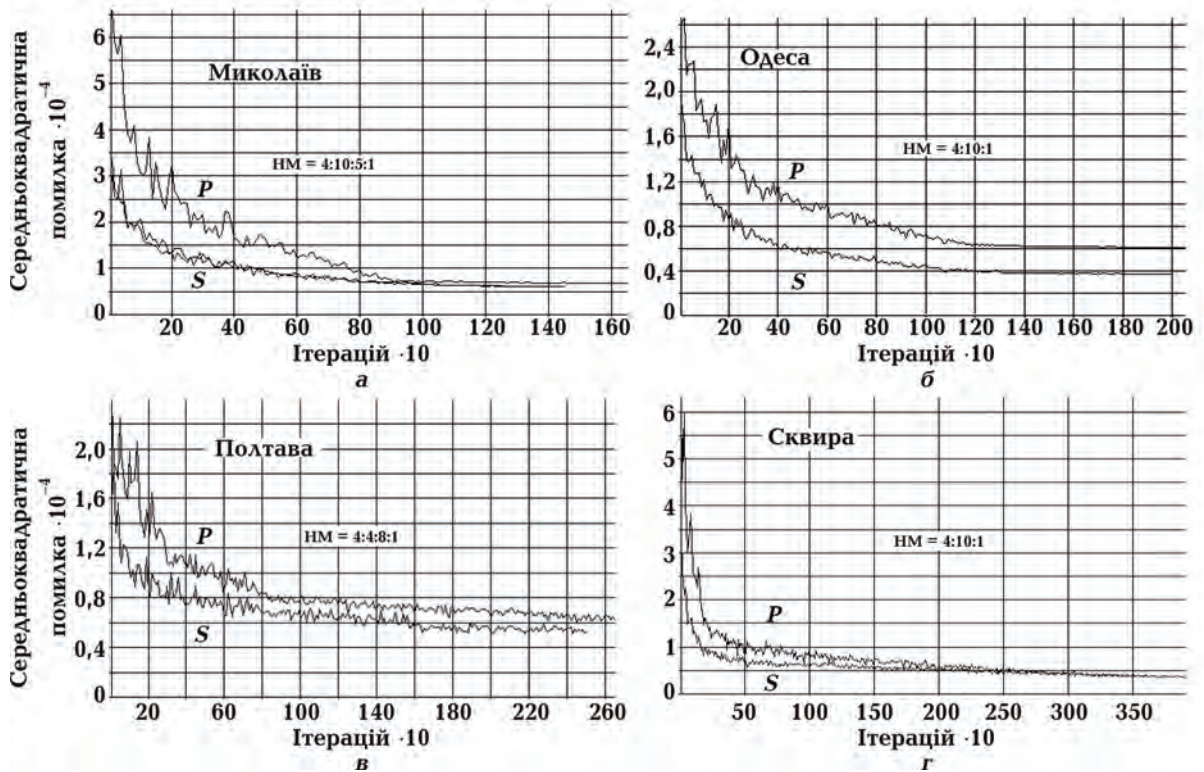


Рис. 4. Поведінка функції втрат залежно від числа ітерацій при навчанні нейронних моделей *P*, *S*-хвиль, що зареєстровані сейсмічними станціями ІГФ НАН України.

Fig. 4. The behavior of the loss function, depending on the number of iterations when learning neural models *P*, *S*-waves registered by seismic stations of the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

узагальнювати накопичені знання та генерувати точні виходи сигналів, які не брали участі в процесі навчання. З метою визначення ефективності нейромережевих моделей годографів *P*-, *S*-хвиль за даними досліджуваної бази даних побудовано регіональні годографи Джефферіса—Буллена $P_{\Delta B}$ -(графік 3) та $S_{\Delta B}$ -(графік 2) хвиль для глибини джерела 0 км (рис. 5).

Параметри джерел землетрусів (табл. 1, 2) розраховано за програмними комплексами WSG. У програму розрахунків годографів було внесено дані нейромережевих моделей годографів *P*- та *S*-фаз і значення глобальних годографів для глибини джерела 0 км за параметрами зареєстрованих землетрусів на сейсмостанціях «Сквира», «Полтава», «Одеса», «Миколаїв».

Приклади наведених нижче локалізацій вогнищ землетрусів проводилася за допомогою обчислення положення гіпоцентра

програмою WSG із застосуванням моделі однорідного середовища (рис. 6, 7).

На рис. 8 епіцентри локальних землетрусів України сформовані: 1) за даними міжнародних агенцій; 2) за результатами нейромережевого моделювання; 3) за годографом Джефферіса—Буллена; 4) за подіями, що були зареєстровані на окремих українських сейсмологічних станціях.

Висновки. Наведено початковий етап робіт за локалізації джерел землетрусів за допомогою нейромережевого моделювання. Різниця між епіцентрами локальних землетрусів місцевих сейсмічних подій, отриманих за даними різних годографів, засвідчує, що нейромережева модель має перспективне значення для виділення зон сейсмічного ризику окремих ділянок території України. Особливо важливими для розвитку нейромоделювання з метою оцінювання потужності і положення сей-

Т а б л и ц я 1 . Параметри локальних землетрусів за отриманими нейромережевими моделями годографів на сейсмостанціях «Сквира», «Полтава», «Одеса», «Миколаїв»

Дата	t_0	φ , °	λ , °	h , км	Станція	t_P	t_S	Δ , град	Азимут, град	Нев'язка по станціях, δt_0
<i>Годограф Полтава</i>										
14.01.2011	5:03:23	47,8169	33,5213	30	«Полтава»	5:03:44	5:04:06	2,03	192,0	0,529
					«Миколаїв»	5:03:36	5:05:56	1,47	63,26	
					«Сквира»	5:04:06	5:04:41	3,52	124,97	
<i>Годограф Сквира</i>										
03.01.2013	2:52:01	47,300	25,018	95	«Полтава»	2:52:22	2:52:36	7,06	250,46	0,170
					«Сквира»	2:53:04	2:53:50	4,33	229,87	
					«Одеса»	2:53:06	2:53:46	4,17	274,18	
<i>Годограф Полтава</i>										
23.06.2013	21:16:29	48,1478	34,0048	5	«Полтава»	21:16:52	21:17:13	1,55	178,34	0,296
					«Сквира»	21:17:21	21:18:05	3,67	115,14	
					«Миколаїв»	21:17:00	21:17:25	2,09	57,95	
<i>Годограф Сквира</i>										
03.02.2015	5:56:31	50,7204	34,401	10	«Полтава»	5:56:49	5:57:04	1,17	4,57	0,139
					«Сквира»	5:57:19	5:57:58	3,40	70,00	
					«Миколаїв»	5:57:31	5:58:18	4,20	24,26	
<i>Годограф Сквира</i>										
19.07.2015	11:30:45	48,202	23,275	5	«Одеса»	11:32:06	11:33:09	5,67	289,34	0,336
					«Полтава»	11:32:35	11:34:04	7,80	264,67	
<i>Годограф Одеса</i>										
30.05.2019	9:31:30	48,585	30,689	12	«Одеса»	9:32:00	9:32:24	1,92	355,86	0,016
					«Полтава»	9:32:11	9:32:44	2,73	249,64	

Т а б л и ц я 2 . Параметри зареєстрованих локальних землетрусів за даними годографа Джеффріса—Буллена на сейсмостанціях «Сквира», «Полтава», «Одеса», «Миколаїв»

<i>Годограф Джеффріса—Буллена</i>										
Дата	t_0	φ°	λ°	h , км	Станція	t_P	t_S	Δ , град	Азимут, град	Нев'язка по станціях, δt_0
14.01.2011	5:03:18	47,8812	33,6678	10	«Полтава»	5:03:44	5:04:06	1,98	193,5	0,537
					«Сквира»	5:04:06	5:04:41	3,45	124,6	
					«Миколаїв»	5:03:36	5:05:56	1,47	60,45	
03.01.2013	2:52:02	47,0327	25,3608	90	«Полтава»	2:53:40	2:54:56	6,77	250,28	0,235
					«Сквира»	2:53:04	2:53:50	4,07	228,39	
					«Одеса»	2:53:06	2:53:46	3,91	275,79	
23.06.2013	21:16:26	48,0888	34,4444	2	«Полтава»	21:16:52	21:17:13	1,52	182,61	0,393
					«Сквира»	21:17:21	21:18:05	3,55	115,46	
					«Миколаїв»	21:17:00	21:17:25	2,01	55,33	
03.02.2015	5:56:30	50,7160	34,4182	35	«Полтава»	5:56:49	5:57:04	1,06	352,63	0,567
					«Сквира»	5:57:19	5:57:58	3,15	70,93	
					«Миколаїв»	5:57:31	5:58:18	4,00	22,07	
19.07.2015	11:30:41	48,2346	23,2364	2	«Одеса»	11:32:06	11:33:09	5,42	289,44	0,55
					«Полтава»	11:32:35	11:34:04	7,57	263,84	
30.05.2019	9:31:27	48,6111	30,7022	21	«Одеса»	9:32:00	9:32:24	1,94	356,1	0,024
					«Полтава»	9:32:11	9:32:44	2,71	249,97	

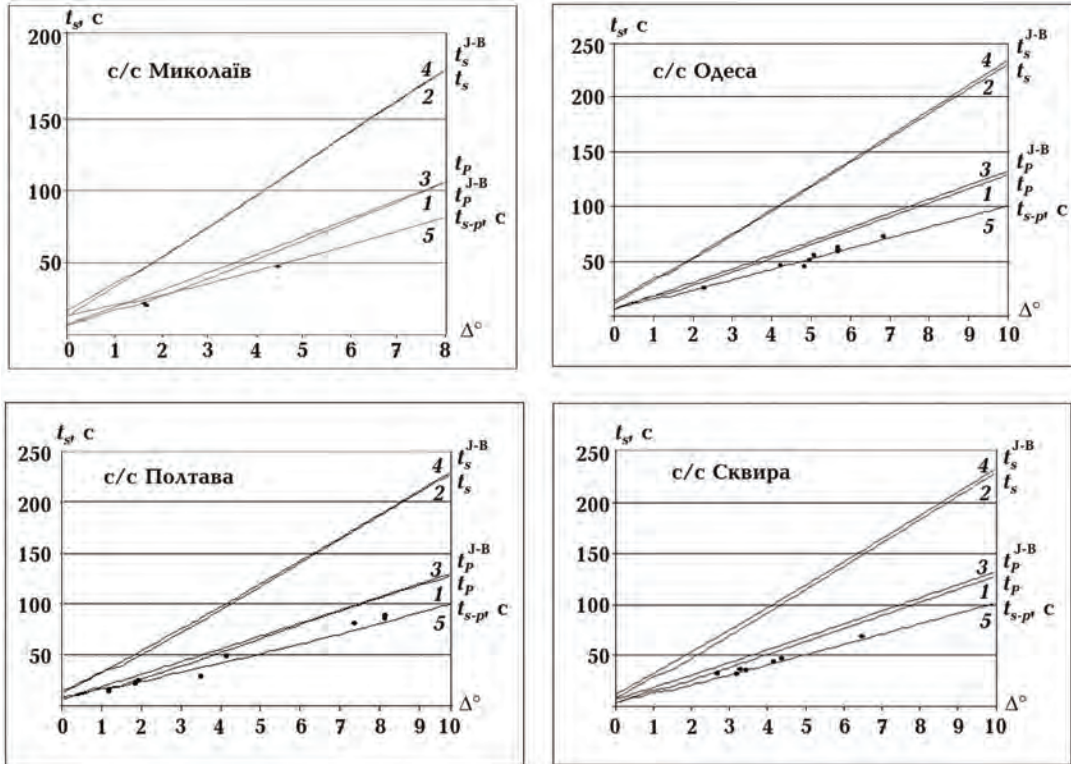


Рис. 5. Годографи P -, S -фаз сейсмічних хвиль локальних сейсмічних подій, зареєстрованих сейсмостанціями «Одеса», «Сквира», «Полтава», «Миколаїв»: 1 — t_p , 2 — t_s — нейрорежеві моделі; 3 — t_p , 4 — t_s моделі Джеффіса—Буллена ($h = 0$ км). Точками на годографі 5 визначені значення t_{S-P} землетрусів України, що наведені в табл. 1, 2.

Fig. 5. Hodographs of seismic waves of local seismic events recorded by a network of stations «Odessa», «Skvira», «Poltava», «Nikolaev»: 1 — t_p , 2 — t_s — neural network models; 3 — t_p , 4 — t_s the Jeffries—Bullen model ($h = 0$ km). The values of t_{S-P} earthquakes in Ukraine are given in the Table. 1, 2 are defined by points on the hodograph 5.

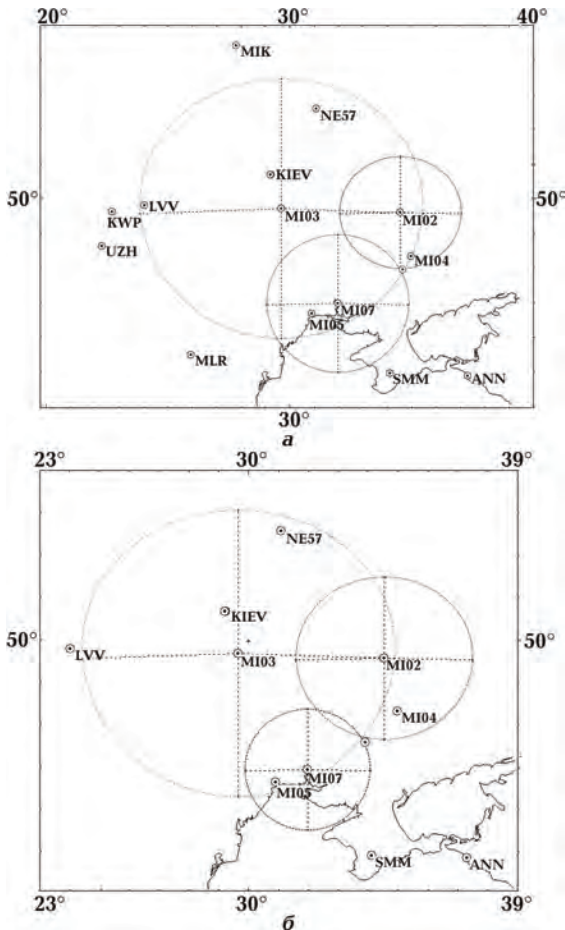


Рис. 6. Приклад локалізації землетрусів Криво-рогського басейну 14.01.2011 р. (а) і 23.06.2013 р. (б) за даними реєстрації сейсмостанціями «Полтава», «Сквира», «Миколаїв».

Fig. 6. An example of localization of earthquakes Krivo-Rog basin on 14.01.2011 (a) and 23.06.2013 (b) by seismic registration data «Poltava», «Skvira», «Mykolaiv».

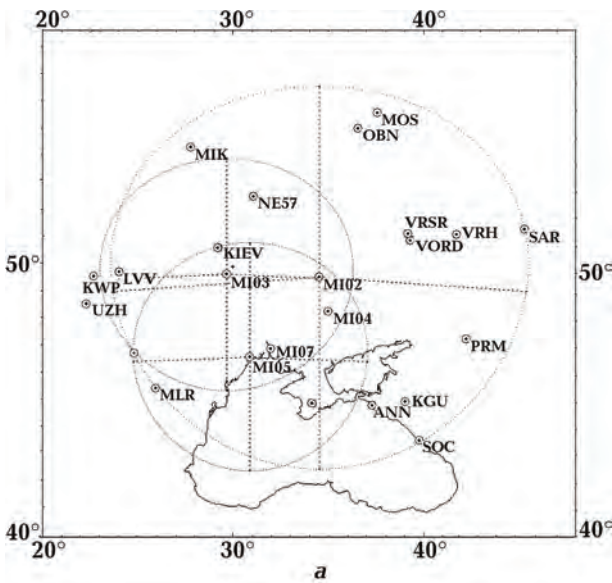


Рис. 7. Приклад локалізації землетрусів Карпат 03.01.2013 р. (а) за даними реєстрації сейсмостанцій «Полтава», «Одеса», «Сквира» і Слобожанщини 03.02.2015 р.; (б) — сейсмостанції «Полтава», «Сквира», «Миколаїв», «Дніпро».

Fig. 7. Example of localization of earthquakes Carpathians 03.01.2013 (a) according to the registration of seismic stations «Poltava», «Odessa», «Skvira» and of Slobozhanshchina 03.02.2015; (б) — seismic stations «Poltava», «Skvira», «Mykolaiv», «Dnipro».

←

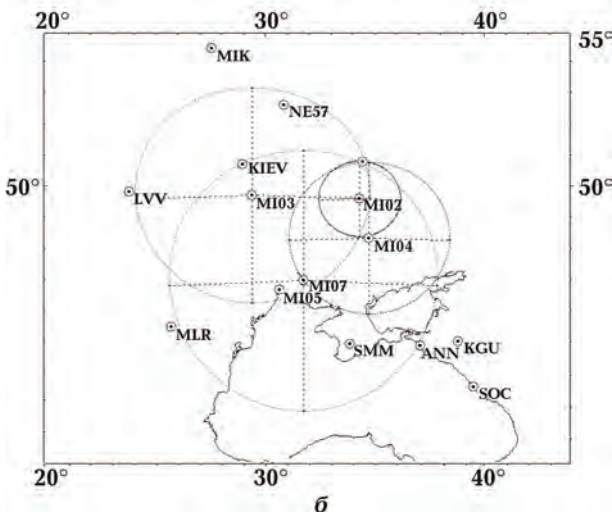
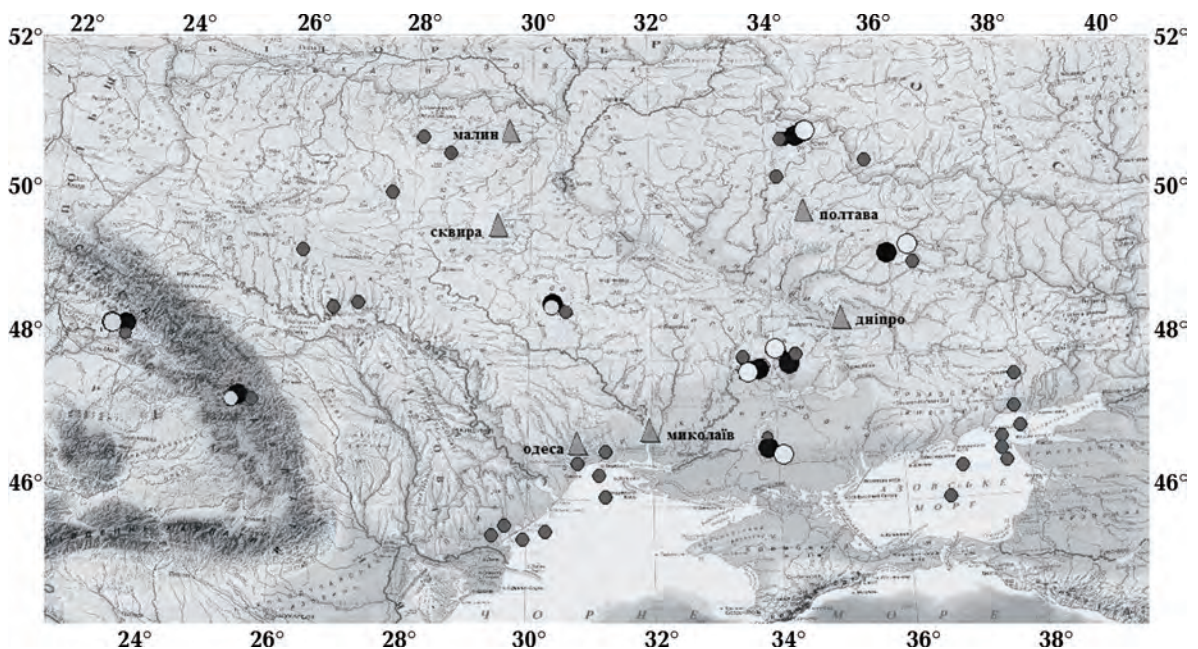


Рис. 8. Карта локальної сейсмічності регіону досліджень за даними моніторингу сейсмостанціями «Сквира», «Одеса», «Полтава», «Миколаїв» за період 2007—2019 рр. для подій з магнітудою в інтервалі 3,4—4,9: трикутники — станції мережі, кола — епіцентри землетрусів, отримані за розрахунками годографів (білі кола — нейромережевих моделей, темні кола — Джефферіса—Булена). Кольоровими колами позначено локальні події за каталогами агенцій ГЦСК, EMSC, Кримської мережі, ГС РАН.

Fig. 8. Map of the local seismicity of the research region according to monitoring data by seismic stations «Skvira», «Odessa», «Poltava», «Mykolaiv» for period 2007—2019 for events with magnitude in interval 3,4—4,9: triangles — stations networks, circles — epicenters of earthquakes, received according to the calculations of hodographs (white circles — neural network models, dark circles — Jeffries—Bullen). Colored circles indicate events on the catalogs of agencies GCCS, EMSC, Crimean network, GS RAS.

↓



смоактивного шару локальних землетрусів у межах промислових територій є необхідність нарощування спостережної мережі й вивчення її можливостей. Нагромадження інформації про вплив неоднорідностей земної кори на точність визначення ко-

ординат джерел землетрусів дасть змогу отримати точніші дані стосовно сучасних сейсмонебезпечних зон, що важливо для подальшого проєктування та діяльності об'єктів громадського та промислового напрямку.

Список літератури

- Андрущенко А.Н., Кутас В.В., Кендзера А.В., Омельченко В.Д., Калитова І.А. Локальные землетрясения на Украинском щите. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 6. С.114—127. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i6.2013.116522>.
- Габсатарова І.П., Бабкова Е.А., Надежка Л.І., Пивоваров С.П., Семенов А.Е., Кендзера А.В., Пигулевский П.И., Щербина С.В., Чалый О.О., Ильенко В.А. Землетрясение 3 февраля 2015 г. На границе Полтавской и Сумской областей Украины по макросейсмическим и инструментальным данным. *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология.* 2016. № 1. С. 115—123.
- Габсатарова І.П., Кендзера А.В., Надежка Л.І., Пигулевский П.И., Бабкова Е.А., Коломиец М.В., Пивоваров С.П. Новое сейсмическое событие в Криворожье и механизм его очага. *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология.* 2013. № 2. С. 134—140.
- Кендзера А.В., Омельченко В.Д., Кутас В.В., Дрогицкая Г.М., Калитова І.А. Эпицентры землетрясений Восточно-Европейской платформы в границах территории Украины по данным инструментальных наблюдений и их связь с тектоникой. *Геодинамика.* 2008. № 1(7). С. 66—77. <https://doi.org/10.23939/jgd2008.01.066>.
- Кендзера А.В., Старовойт О.Е., Омельченко В.Д., Надежка Л.І., Вольфман Ю.М., Габсатарова І.П., Пивоваров С.П., Лесовой Ю.В. Криворожское землетрясение 25 декабря 2007 г. Инструментальные данные. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 2. С. 60—71. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i2.2012.116611>.
- Кутас В.В., Омельченко В.Д., Андрущенко А.Н., Гордиенко Ю.А. Очаги землетрясений на восточно-европейской платформе в пределах территории Украины в 2005—2008 годах: *Матер. XVI Междунар. конф. 20—24 сентября 2010 г.* Воронеж, 2010, С. 321—326.
- Кутас В.В., Омельченко В.Д., Дрогицкая Г.М., Калитова І.А. Криворожское землетрясение 25 декабря 2007 г. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 1. С. 42—52.
- Кутас В.В., Омельченко В.Д., Дрогицкая Г.М., Калитова І.А. Сейсмичность западной части Восточно-Европейской платформы в пределах Украины. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 5. С. 59—72.
- Лазаренко М.А., Герасименко О.А. Нейросетевое моделирование годографов сейсмических волн. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 5. С. 126—141. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i5.2010.117516>.
- Лазаренко М.А., Герасименко О.А., Остапчук Н.Н. Нейросетевые модели локальных годографов сейсмических волн. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. С. 157—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116802>.
- Пустовитенко Б.Г., Бондарь М.Н., Князева В.С., Скляр А.М., Эреджепов Э.Э. Криворожское-II землетрясение 14 января 2011 г. с $M_S = 3,6$, $M_w = 3,6$, $I_0 = 5$ (Украина, Днепропетровская область). В кн.: *Землетрясения северной Евразии, 2011 год.* Обнинск: Изд. ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 305—313.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А., Скляр А.М. Инструментальные и макросейсмические данные о процессах в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 2. С. 75—97. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i2.2010.117558>.
- Sherbaum, F., & Johnson, J. (1994). *Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis.* Ell Cerrito. P. 269.

Нейромережеве моделювання в задачі локалізації джерел землетрусів території України

О.О. Герасименко, Л.О. Шумлянська, Л.І. Надежка, О.З. Ганієв, С.П. Пивоваров, Н.М. Остапчук, Н.Л. Шипко, 2020

У статті наведено приклад використання нейромережевого моделювання в задачі локалізації вогнищ землетрусів території України, зареєстрованих мережею сейсмічних станцій ІГФ НАН України «Одеса», «Сквира», «Полтава», «Миколаїв». За даними моніторингу 2007—2019 рр. авторами сформовано бази сейсмологічної інформації локальних і регіональних подій, зареєстрованих на станціях мережі спостережень. Використовуючи можливості потужного інструменту статистичного аналізу — нейронних мереж, автори побудували локальні годографи *P*-, *S*-хвиль території України, а саме, землетрусів УЩ, ДДЗ і акваторії Азовського моря в діапазоні магнітуд 2,7—4,8 по записах чотирьох сейсмічних станцій ІГФ в формі, що дозволяє інтегрування їх в сучасні засоби цифрової обробки. Для уточнення часів приходу фаз сейсмічних хвиль в межах досліджуваного регіону, що погано піддаються візуальними оцінками, автори використовують при обробці сигналів програмовані додатки високого рівня на модельованих азимутах. У статті наводяться зразки роботи мережі в операційному режимі. Проведене моделювання задачі локалізації дозволяє з достатньою точністю конструювати вогнища сейсмічних подій в промислових регіонах України, що підтверджує іспит отриманих результатів глобальними годографом Джефферіса—Буллена. Наведені приклади локалізації землетрусів 2011, 2013 років з магнітудою 3,9 і 4,6 в районі Криворізького басейну дають додаткові можливості аналізу особливостей будови літосфери, а в перспективі — оцінки в умовах реального часу характеристик сейсмічного процесу в завданню його попередження.

Ключові слова: вогнище, землетрус, локалізація, нейронні мережі, моделювання, годограф, сейсмічні станції, територія, Україна, хвилі, оцінка, реальний час, процес, попередження.

Neural network modeling in the problem of source localization earthquake of Ukraine

O.O. Gerasymenko, L.O. Shumlyanska, L.I. Nadezhka, O.Z. Ganiev, S.P. Pivovarov, N.M. Ostapchuk, N.L. Shipko, 2020

An example of using the capabilities of neural network modeling in the problem of localizing the sources of earthquakes in the territory of Ukraine registered by the network of seismic stations of the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine: «Odessa», «Squira», «Poltava», «Nikolaev». According to monitoring data 2007—2019, the authors conducted a continuous accumulation of a seismological database, including for organizing the functioning of a neural network, in the first place, the formation of a training set. Using the capabilities of a powerful statistical analysis tool — neural networks, the authors built local hodographs of *P*-, *S*-waves of the territory of Ukraine, namely, earthquakes of the Ukrainian Shield, the Dnieper-Donets Depression and the Sea of Azov in the magnitude range 2,7—4,8 from the records of four institute seismic stations geophysicists in a form that allows them to be integrated into modern means of digital processing. To clarify the arrival times of the phases of seismic waves within the study region that are poorly visually assessed, the authors use a high level of programmable applications in simulated azimuths to process the signals. The article provides examples of network operation in operational mode. The simulation of the localization problem al-

lows us to accurately design the foci of seismic events in the industrial regions of Ukraine, which confirms the examination of the results by global Jeffries—Bullen hodographs. The examples of localization of earthquakes of 2011, 2013 with magnitudes of 3.9 and 4.6 in the region of the Kryvyi Rih basin provide additional opportunities for analyzing the structural features of the lithosphere, and in the future, real-time assessments of the characteristics of the seismic process to prevent it.

Key words: source, earthquake, localization, neural networks, modeling, hodograph, seismic stations, territory, Ukraine, waves, estimation, real time, process, warning.

References

- Andrushchenko, A.N., Kutas, V.V., Kendzera, A.V., Omelchenko, V.D., & Kalitova, I.A. (2013). Local earthquakes on the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 35(6), 114—127. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i6.2013.116522> (in Russian).
- Gabsatarova, I.P., Babkova, E.A., Nadezhka, L.I., Pivovarov, S.P., Semenov, A.E., Kendzera, A.V., Pigulevskiy, P.I., Scherbina, S.V., Chalyy, O.O., & Ilyenko, V.A. (2016). Earthquake February 3, 2015. On the border of the Poltava and Sumy regions of Ukraine according to macroseismic and instrumental data. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya*, (1), 115—123 (in Russian).
- Gabsatarova, I.P., Kendzera, A.V., Nadezhka, L.I., Pigulevskiy, P.I., Babkova, E.A., Kolomiets, M.V., & Pivovarov, S.P. (2013). A new seismic event in Kryvyi Rih and the mechanism of its focus. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya*, (2), 134—140 (in Russian).
- Kendzera, A.V., Omelchenko, V.D., Kutas, V.V., Drogitskaya, G.M., & Kalitova, I.A. (2008). Epicenters of East-European platform earthquakes within the Ukraine territory by data of instrumental supervisions and their connection with tectonics. *Geodynamika*, (1), 66—77. <https://doi.org/10.23939/jgd2008.01.066> (in Russian).
- Kendzera, A.V., Starovoyt, O.E., Omelchenko, V.D., Nadezhka, L.I., Wolfman, Yu.M., Gabsatarova, I.P., Pivovarov, S.P., & Lesovoy, Yu.V. (2012). The Kryvoy Rog earthquake on the 25th December 2007. Instrumental data. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(2), 60—71. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i2.2012.116611> (in Russian).
- Kutas, V.V., Omelchenko, V.D., Andrushchenko, A.N., & Gordienko, Yu.A. (2010). The centers of earthquakes on the East European platform within the territory of Ukraine in 2005—2008: *Proc. of the XVI Int. Conf. September 20—24, 2010* (pp 321—326). Voronezh (in Russian).
- Kutas, V.V., Omelchenko, V.D., Drogitskaya, G.M., & Kalitova, I.A. (2009). Kryvyi Rog earthquake on December 25, 2007. *Geofizicheskiy zhurnal*, 31(1), 42—52 (in Russian).
- Kutas, V.V., Omelchenko, V.D., Drogitskaya, G.M., & Kalitova, I.A. (2007). Seismicity of the western part of the East European platform within Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(5), 59—72 (in Russian).
- Lazarenko, M.A., & Gerasimenko, O.A. (2010). Neural network simulation of the travel time curves of seismic waves. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(5), 126—141. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i5.2010.117516> (in Russian).
- Lazarenko, M.A., Gerasimenko, O.A., & Ostapchuk, N.N. (2011). Neural network models of local time curves of seismic waves. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(6), 157—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116802> (in Russian).
- Pustovitenko, B.G., Bondar, M.N., Knyazeva, V.S., Sklyar, A.M., & Eredzhepov, E.E. (2017). Kryvoy Rog-II earthquake January 14, 2011 with $MS = 3.6$, $M_w = 3.6$, $I_0 = 5$ (Ukraine, Dnepropetrovsk region). In *Earthquakes of Northern Eurasia, 2011* (pp. 305—313). Obninsk: Edition of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences» (in Russian).
- Pustovitenko, B.G., Kulchitskiy, V.E., Pustovitenko, A.A., & Sklyar, A.M. (2010). Instrumental and macroseismic data on processes in the focal zone of the Krivoy Rog earthquake on December 25, 2007. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(2), 75—97. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i2.2010.117558> (in Russian).
- Sherbaum, F., & Johnson, J. (1994). *Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis*. Ell Cerrito. P. 269.